

## 激光与光电子学进展

## 基于 STM32H743 的调频连续波位移传感器

韩园<sup>1</sup>, 郑刚<sup>2\*</sup>, 张雄星<sup>2</sup>, 盛启明<sup>1</sup>, 白浪<sup>2</sup><sup>1</sup>西安工业大学电子信息工程学院, 陕西 西安 710021;<sup>2</sup>西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

**摘要** 针对线性调频连续波位移传感器信号采样率和信号处理速度低的问题, 本文基于 STM32H743 芯片设计了一种法布里-珀罗干涉仪结构的光纤位移传感器。该光纤位移传感器使用锯齿波对激光器的频率进行调制, 选用 STM32H743 作为核心处理器提高信号采集和处理速度, 其主频为 400 MHz, 模数转换器最大转换速率为 4.5 MHz, 再结合调频连续波激光干涉测量技术对固定腔长的不锈钢管和运动目标的位移量进行测量。实验结果表明, 该位移传感器在 200~400 mm 测量实验中, 对 1 mm/s 运动目标的测量结果标准差小于 3.3 nm, 在 600 mm 范围内线性拟合系数在 0.99998 以上, 其在位移测量领域具有良好的应用前景。

**关键词** 测量; 调频连续波; 位移测量; 激光干涉测量; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1112007

## Frequency Modulation Continuous Wave Displacement Sensor Based on STM32H743

Han Yuan<sup>1</sup>, Zheng Gang<sup>2\*</sup>, Zhang Xiongxing<sup>2</sup>, Sheng Qiming<sup>1</sup>, Bai Lang<sup>2</sup><sup>1</sup>*School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University,  
Xi'an, Shaanxi 710021, China;*<sup>2</sup>*School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China*

**Abstract** Aiming at the problem of low signal sampling rate and signal processing speed of linear frequency modulation continuous wave displacement sensor, this paper designs a fiber optic displacement sensor with a Fabry-Perot interferometer structure based on STM32H743 chip. The optical fiber displacement sensor uses sawtooth wave to modulate the frequency of the laser, and selects STM32H743 as the core processor to improve the signal acquisition and processing speed. Its main frequency is 400 MHz, and the analog to digital converter maximum conversion rate is 4.5 MHz. Combined with frequency modulated continuous wave laser interferometry, the displacement of stainless steel pipe with fixed cavity length and moving target is measured. Experimental results show that in the 200–400 mm measurement experiment, the standard deviation of the measurement result of 1 mm/s is less than 3.3 nm, and the linear fitting coefficient in the range of 600 mm is above 0.99998, which has a good application prospect in the field of displacement measurement.

**Key words** measurement; frequency modulated continuous wave; displacement measurement; laser interference measurement; Fabry-Perot interferometer

**OCIS codes** 120.3180; 120.2230; 120.3930; 120.5050

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2020-11-20; 录用日期: 2020-12-08

\*E-mail: zhengg@xatu.edu.cn

## 1 引言

光纤位移传感器<sup>[1]</sup>由于具有结构简单、精度高、响应快等优点,在现代光刻机制造、航天航空、生物医疗等领域得到广泛应用。随着光纤位移传感器的发展,众多的激光位移测量方法应运而生,目前,激光测量的方法主要有相位法、脉冲法、调频连续波(FMCW)激光干涉法等<sup>[2-4]</sup>。调频连续波激光干涉技术具有非接触、高精度、可实现大范围动态测量等特点<sup>[5]</sup>,可通过光程差和物理量的转换实现位移、温度、压力、应变等物理量的测量<sup>[6]</sup>。

为实现位移测量系统中位移量的高精度非接触测量,诸多国内外学者在该领域进行了大量研究和方案论证。南京师范大学刘强等<sup>[7]</sup>在时域解调相位的原理基础上,引入正弦相位调制技术,提高了在位移测量中激光自混合干涉仪的测量精确度,在百毫米位移测量范围内实现了位移测量误差小于  $0.5 \mu\text{m}$ ;祝宏彬<sup>[8]</sup>搭建了一种基于正交解调技术的零差激光干涉位移测量系统,在激光干涉仪中引入  $1/8$  波片,采用正交信号解调算法实时解调采集到的两路正交信号,最终实现了位移信号重构,实验结果表明,在  $0\sim 200 \text{ mm}$  量程内,测量精度为  $0.7 \mu\text{m}$ ;合肥工业大学胡梦雯<sup>[9]</sup>提出了一种对干涉拍频信号进行细分和解调的方法,通过对搭建的单频激光干涉仪产生的信号进行误差实时补偿,实现了位移的高精度测量,并提高了信号处理的实时性,其研制的单频激光干涉仪在  $0\sim 20 \text{ mm}$  量程内测量结果最大偏差小于  $40 \text{ nm}$ ;Tanaka 等<sup>[10]</sup>提出了一种简单、精确的高频位移测量方法,利用三角波进行参考光的相位调制,通过对拍频信号波形的监测实现位移测量。该方法不需要复杂的控制系统和复杂的计算,成功地测量了频率为  $1 \text{ MHz}$ 、振幅约为  $55 \text{ nm}$  的压电陶瓷(PZT)反射镜的实际机械振动位移波形;Furukawa 等<sup>[11]</sup>提出了一种包络曲线折叠法,用于简单而精确的动态位移测量,具有  $1 \text{ ns}$  的时间分辨率,这是基于激光的非接触位移测量的最高值之一。该方法可以用于测量使用相位调制器模拟瞬时频率为  $100 \text{ MHz}$ 、最大峰值至峰值振幅超过  $100 \text{ nm}$  的动态位移。

针对线性调频连续波激光干涉位移测量系统中由于干涉信号采样率较低、信号处理速度慢的问题,本文采用 STM32H743 芯片作为核心处理器进行软件编程和硬件电路设计<sup>[12]</sup>,其主频为

$400 \text{ MHz}$ ,模数转换器(ADC)采样率为  $4.5 \text{ MHz}$ ,对比主频为  $168 \text{ MHz}$ 、ADC 采样率为  $2.8 \text{ MHz}$  的 STM32F407 芯片有了明显的提升,解调处理速度从  $20 \text{ kHz}$  提高到  $32 \text{ kHz}$ 。研究搭建了一种全光纤式法布里-珀罗干涉仪结构<sup>[13-14]</sup>的调频连续波激光干涉光学测量系统,该系统主要包括调制信号发生系统、光学干涉系统和信号采集与处理系统等三个部分,并借助该系统进行了固定腔长漂移量测量、运动目标稳定性和线性度重复性测量实验。

## 2 基本原理

FMCW 激光干涉测量技术是一种新型相干探测技术,相对于传统的激光干涉测量技术,调频连续波激光干涉技术测量出的是动态的干涉拍频信号,通过相位细分的方式对光学干涉信号进行细化处理,能够更加容易分辨出相位移动的方向和整周期数<sup>[15-17]</sup>。如图 1 所示,采用锯齿波电流波形调制激光器的频率,定义锯齿波的调制信号的周期为  $T_m$ ,两个相干光波的角频率波形和产生的拍频信号可以用图 1 所示的曲线描述,其中,实线代表参考波的角频率,虚线代表信号波的角频率,点划线对应于所生成拍频信号的角频率, $\omega_0$  表示调制周期中心位置的角频率, $\Delta\omega$  表示角频率调制范围。

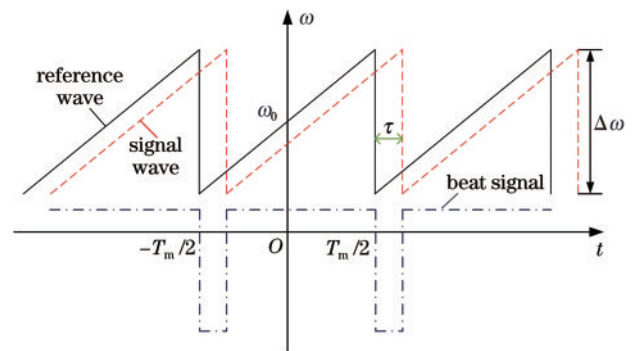


图 1 调频连续波激光干涉中干涉波与拍频信号的角频率关系

Fig. 1 Angular frequency relationship between interference wave and beat signal in FMCW laser interference

根据 FMCW 激光干涉测量原理,由于参考目标与待测目标反射回来的参考光与信号光之间存在光程差  $D_{\text{OPD}}$ ,导致二者之间存在时间延迟  $\tau$ 。参考光和信号光的光程差可以写为

$$D_{\text{OPD}} = 2nd, \quad (1)$$

式中:  $n$  为空气的折射率 ( $n \approx 1$ );  $d$  为折射率透镜表面与待测物体前的距离。当使用锯齿波波形来调制激光器频率时, 参考光和信号光发生干涉现象, 测得的拍频信号在每个调制周期内的光强表达式为

$$I(\tau, t) = I_0 [1 + V \cos(\alpha \tau t + \omega_0 \tau)], \quad (2)$$

$$I(D_{\text{OPD}}, t) = I_0 \left[ 1 + V \cos \left( \frac{2\pi \Delta \nu \nu_m D_{\text{OPD}}}{c} t + \frac{2\pi}{\lambda_0} D_{\text{OPD}} \right) \right] = I_0 [1 + V \cos(2\pi \nu_b t + \phi_{b0})], \quad (3)$$

式中:  $\nu_b = \Delta \nu \nu_m D_{\text{OPD}} / c$  为干涉拍频信号的频率;  $\Delta \nu$  为光学频率调制范围;  $\nu_m$  为调制信号的频率 ( $\nu_m = 1 / T_m$ );  $c$  为光速;  $\phi_{b0}$  为拍频信号的初相位;  $\lambda_0$  为光波的中心波长。

根据(1)式, 拍频信号的频率  $\nu_b$  可以写为

$$\nu_b = \frac{2nd\Delta\nu\nu_m}{c}. \quad (4)$$

拍频信号的初相位  $\phi_{b0}$  可写为

$$\phi_{b0} = \frac{4\pi nd}{\lambda_0}. \quad (5)$$

式中:  $I_0 = I_1 + I_2$  为干涉拍频信号的平均光强;  $I_1, I_2$  分别为参考光和信号光的光强;  $V = 2\sqrt{I_1 I_2} / (I_1 + I_2)$  为拍频信号的对比度;  $\alpha = \Delta \omega / T_m$  为角频率调制率;  $\Delta \omega$  为光学角频率调制范围;  $\omega_0$  为调制中心位置的角频率。由参考光和信号光之间的光程差, 拍频信号光强可表示为

因此, 测量拍频信号的初相位的变化, 可以得到目标的相对位移为

$$\Delta d = \frac{\lambda_0}{4\pi n} \Delta \phi_{b0}. \quad (6)$$

### 3 位移测量系统总体方案设计

根据激光调频连续波激光干涉技术, 并在实验室已有基础上, 设计了调频连续波激光干涉位移测量系统, 系统框图如图 2 所示, 主要包括调制信号发生系统、光学干涉系统和信号采集与处理系统。

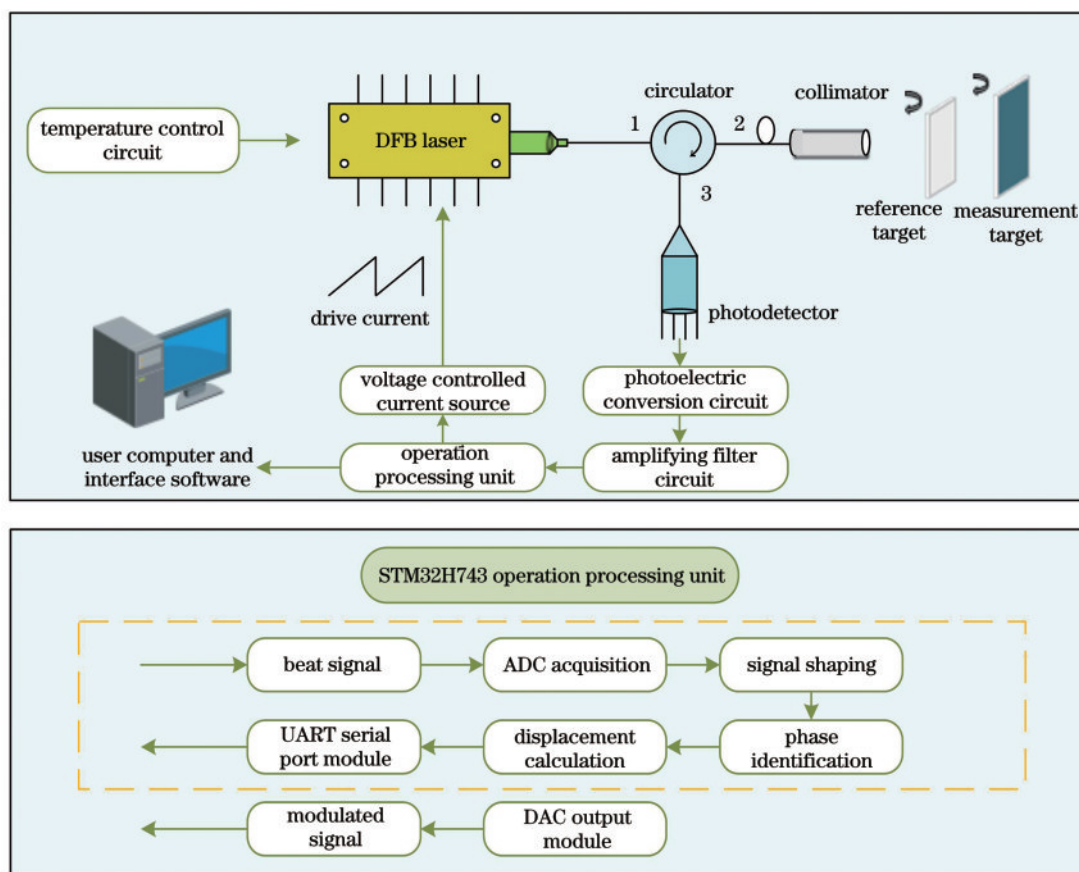


图 2 光纤调频连续波激光干涉位移测量仪系统框图

Fig. 2 Optical fiber FMCW laser interferometer displacement measurement system block diagram

通过搭建法布里-珀罗干涉仪结构的调频连续波激光干涉系统,得到携带有目标相位信息的拍频信号,并通过硬件电路采集系统实现拍频信号的采集;再根据 FMCW 激光干涉原理与拍频信号特点,设计并编写信号解调算法,对信号进行整形和相位鉴定;根据光程差和相移之间的线性关系推断出位移量,最终完成光纤调频连续波激光干涉位移测量仪的制作,实现非接触式、高精度的相对位移测量。

### 3.1 调制信号发生系统

调制信号发生系统主要由以 STM32H743IIT6 微控制器为核心的数模转换(DAC)模块、压控电流源模块、温控模块等三部分构成。该信号发生系统利用压控电流源电路将数模转换模块输出的锯齿波调制电压信号转换为电流信号,使用一种连续改变分布式反馈(DFB)半导体激光器注入电流的方式对其光频进行线性调制;同时为避免外界环境及激光器自身温度变化对激光器中心波长造成影响,利用温控电路对 DFB 激光器的工作温度进行调节,实现稳定可靠的 FMCW 线性调频激光输出。

### 3.2 光学干涉系统

相比于迈克耳孙和马赫-曾德尔干涉仪结构,法布里-珀罗干涉仪结构工作更稳定,系统结构更加紧凑。由于其信号光与参考光共光路,抗干扰能力更强,受振动或温度变化的影响较小,因此本研究选择搭建光纤式法布里-珀罗干涉仪结构的光学干涉系统,系统示意图如图 3 所示。选用分布式反馈激光器作为系统光源,利用电流调制出射连续调频激光,通过单模光纤将连续调频激光耦合进入光纤环行器 1 端口,并从 2 端口出射至光纤准直器。光纤准直器将传输光波耦合为空间光束并照射 F-P 腔(F-P 腔由部分反射镜与全反镜组成)。此时将 20% 的部分反射镜反射回来的一部分光作为系统的参考光,另一部分光透射至全反

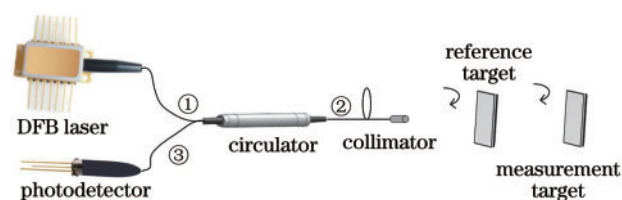


图 3 光学干涉系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical interference system structure

射镜之后又经过原路径返回,该返回后的光作为信号光。当信号光与参考光再次相遇时发生干涉,产生拍频信号,再通过光纤准直器耦合进入光纤中,从环行器 2 端口入射至 3 端口,由光电探测器接收。

### 3.3 信号采集与处理系统

信号采集与处理系统包括跨阻放大电路与 STM32H743IIT6 微控制器的 AD 模块,其目的是实现拍频信号的采集。由光电探测器接收的光电流经过跨阻放大电路后,可实现将光信号转换为电信号进而将电信号初步放大的功能,同时可根据信号特点增加硬件滤波。再利用微控制器的 AD 模块对电信号进行模数转换,送入微控制器运算处理单元,便于后续信号解调。

根据调频连续波干涉位移测量系统设计方案,完成了光学系统的搭建与硬件电路板的制作,并完成了位移测量系统的搭建,FMCW 激光干涉位移测量系统示意图如图 4 所示。

其中,以中心波长为 1550 nm 的 DFB 半导体激光器作为系统光源,部分反射镜作为参考目标,为保证系统结构紧凑,将其粘贴在光纤准直器前端,合作反射镜作为待测目标,安装在直驱线性电动平移台上,并利用线性直流稳压电源为硬件电路板供电。通过在微控制器中编写锯齿波调制信号波形函数,并利用信号发生电路产生调制电流信号。在对 DFB 半导体激光器的频率进行连续调制时采用更改其注入电流大小的方式进行线性调制,且保证电流最小值高于激光器阈值电流,最大值低于激光器额定电流,避免激光器损坏。设定电流最大值为 75 mA,最小值为 45 mA,平均值为 60 mA,对半导体激光器进行锯齿波调制,出射激光经过光学干涉系统后产生拍频信号,并由信号采集系统获取。

信号处理电路的整体框图如图 5 所示,以 STM32H743IIT6 微控制器为核心,其主频高达 400 MHz,采用 12 位 DAC 输出调频锯齿波,通过压控电流源电路和温控电路对半导体激光器进行驱动和控温,并对光学干涉信号进行高速 ADC 采集和信号处理,其中,ADC 的最大转换率为 4.5 MHz;通过串口通信和按键电路实现传感器与上位机和液晶显示器(LCD)的人机交互。

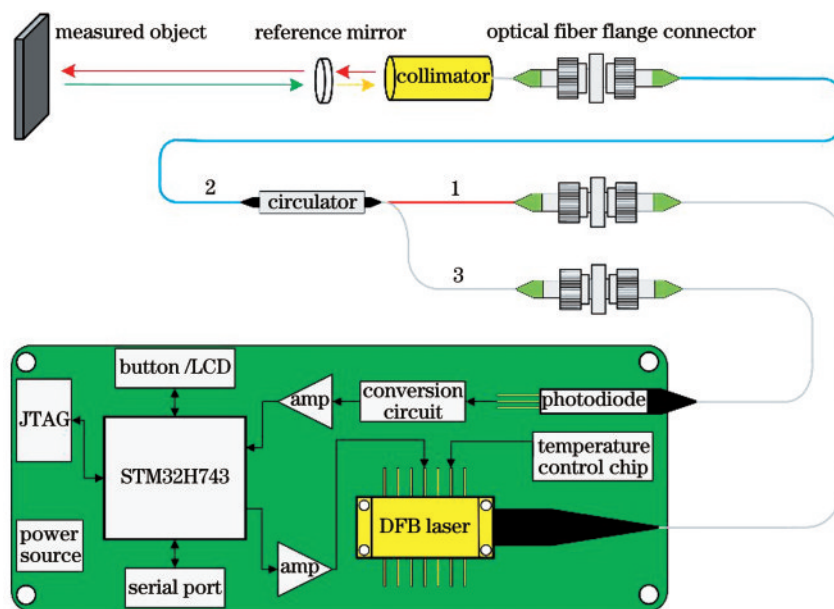


图 4 调频连续波激光干涉位移测量系统示意图

Fig. 4 Frequency modulated continuous wave laser interferometric schematic diagram of displacement measurement system

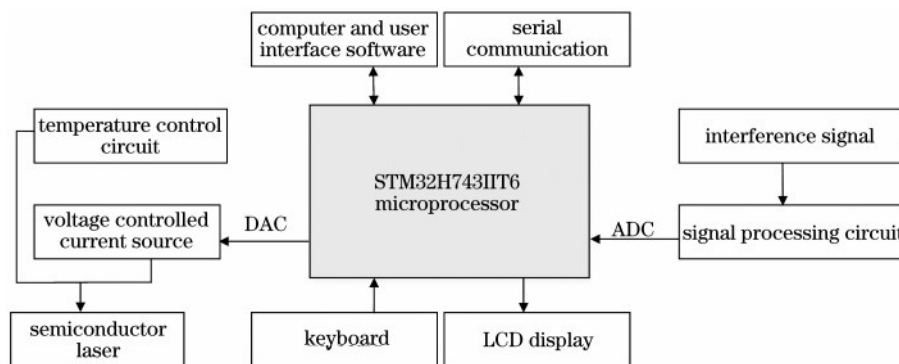


图 5 信号处理电路整体框图

Fig. 5 Overall block diagram of signal processing circuit

## 4 实验验证与分析

### 4.1 固定波长测量实验

在实验中,采用不锈钢钢管制作了一个固定长度为 180 mm 的 F-P 腔。在光纤准直器表面采用紫外胶粘贴一个反射率为 20% 的部分反射镜,之后将附着有半反射镜的光纤准直器插入黄铜管中进行胶体固定,再将该粘贴的整体结构插入不锈钢管中固定,并在钢管的另一端粘贴全反射镜,两个反射镜组成 F-P 腔,将其 F-P 腔连接到光纤环形器的 2 端口进行测量实验,实验装置图如图 6 所示。

根据图 7 对固定腔长测量结果进行分析,平均量为 0.08 nm,根据标准差计算公式可得唯一测量

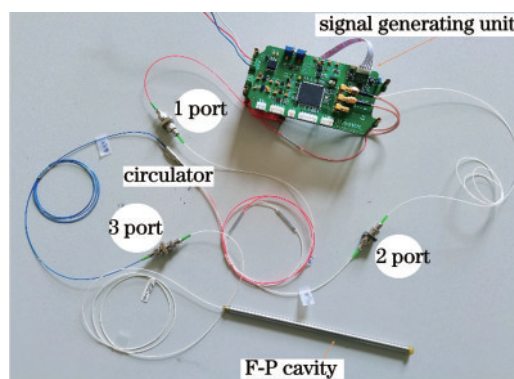


图 6 固定波长实验装置图

Fig. 6 Fixed wavelength experimental setup diagram

标准差约为 3.3 nm。该实验完成了固定腔长的波动测量。由于该传感器为固定腔,位移变化较小,测量结果在 0 nm 附近波动,说明该调频连续波激

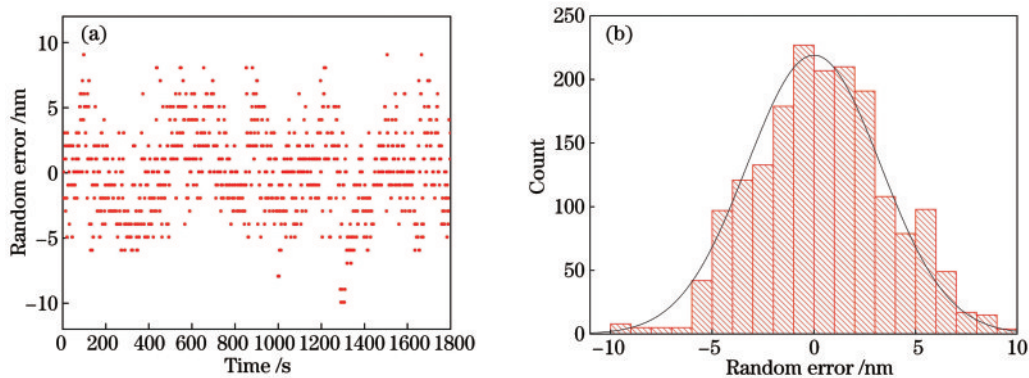


图 7 腔长波动实验测量结果。(a)腔长波动随机误差图;(b)腔长波动随机误差直方分布图

Fig. 7 Experimental measurement results of cavity length fluctuations. (a) Random error of cavity length fluctuation; (b) histogram of random error of cavity length fluctuation

光干涉位移传感器具有良好的稳定性,其固定腔长的位移漂移主要受相位解调算法和外界环境的影响。

#### 4.2 运动目标位移测量实验

在气浮光学平台上搭建了法布里-珀罗干涉结构的光纤式 FMCW 干涉位移测量系统,实验装置如图 8 所示。利用信号发生电路产生锯齿波调制电流,对中心波长为 1550 nm 的 DFB 半导体激光器进行调制。为使系统结构紧凑,将 20% 部分反射镜粘贴在准直器前端,并在线性电动位移台滑块上安装合作反射镜,作为待测目标。参考光与信号光干涉产生的拍频信号由光电探测器接收,以 STM32H743IIT6 为主控器的调理电路进行信号处理,并编写拍频信号解调算法实现待测目标位移测量。

利用调频连续波干涉测距系统对不同位置处

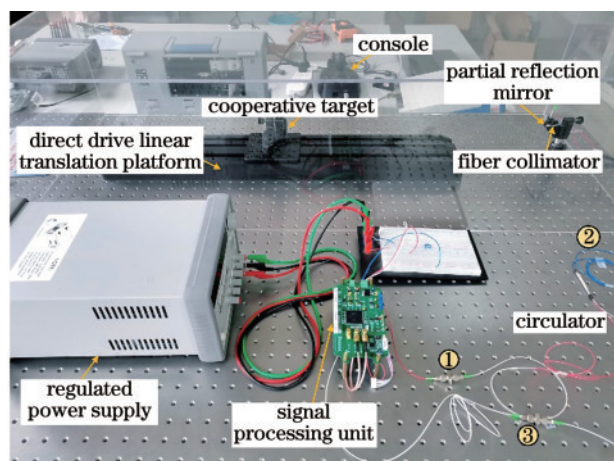


图 8 光纤 FMCW 干涉位移测量实验装置图

Fig. 8 Experimental device diagram of optical fiber FMCW interference displacement measurement

固定点目标进行位移测量,利用串口每秒输出一次测量结果,并由上位机系统接收保存,测量时间共计 30 min,3 个位置处目标测量结果与正态分布如图 9 所示。

对不同位置的固定点目标进行标准差分析计算,得到其测量结果如图 10 所示。

结合图 9 和图 10 可以看出,目标在 200 mm、400 mm 和 600 mm 处的测量结果标准差分别为 1.9 nm、2.7 nm 和 8.7 nm,数据分布呈现正态分布,但测量误差随着距离的增加而逐渐增大,这是外界环境的扰动以及半导体激光器激光光束的质量影响导致的。激光光束在准直器的工作距离处具有最好的出射光斑,当距离继续增大时,会导致反射回归的信号质量下降,信号光的光功率逐渐减小,再加上外界环境对系统的影响,都会对测量结果产生一定的影响。

#### 4.3 运动目标线性度实验

将待测目标安装在线性位移平台上(行程为 600.000 mm,轴向定位精度为  $\pm 12.00 \mu\text{m}$ ,双向重复性为  $\pm 0.25 \mu\text{m}$ ,最大运动速度为 400.000 mm/s),并利用控制软件控制待测目标匀速往返运动。目标初始位置分别为 0 mm、200 mm,设置电动位移台的位移步进量为 50 mm,物体的移动速度为 1 mm/s,每秒记录一次测量结果,测量结果如图 11 所示。

分别对 200~400 mm 运动范围和 0~600 mm 运动范围测量结果进行线性拟合,在锯齿波调制下得到的测量结果  $R^2$  均为 0.9998,该运算结果表明,调频连续波激光干涉位移测量系统具有良好的线性度。

根据图 12 可以看出,在 200~400 mm 和 0~

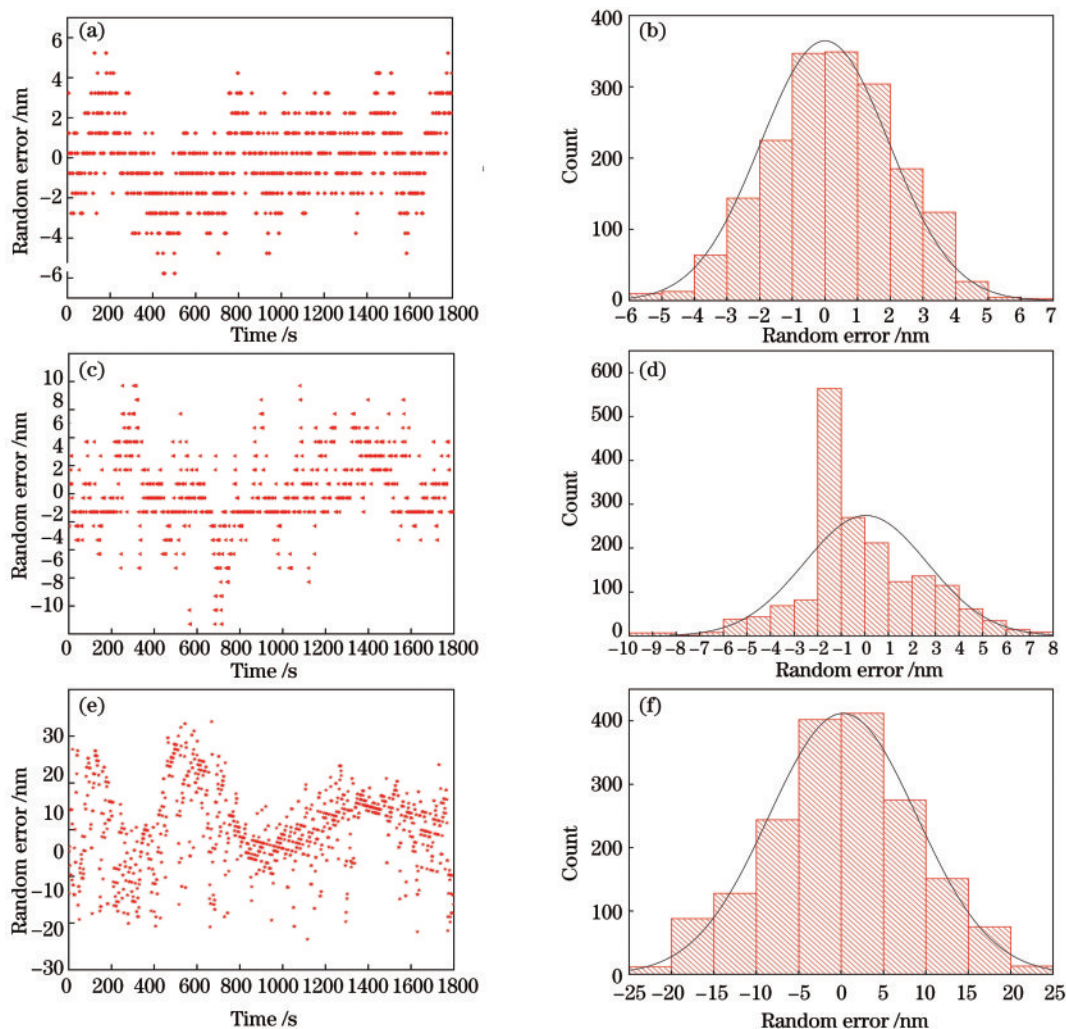


图 9 不同位置处固定点目标测量结果散点图和分布图。(a)(c)(e) 200 mm 处、400 mm 处和 600 mm 处测量结果散点图；  
(b)(d)(f) 200 mm 处、400 mm 处和 600 mm 处测量结果分布图

Fig. 9 Scatter plots and distribution plots of the measurement results of fixed point targets at different locations. (a)(c)(e) Scatter plots of measurement results at 200 mm, 400 mm, and 600 mm, respectively; (b)(d)(f) distribution plots of measurement results at 200 mm, 400 mm, and 600 mm, respectively

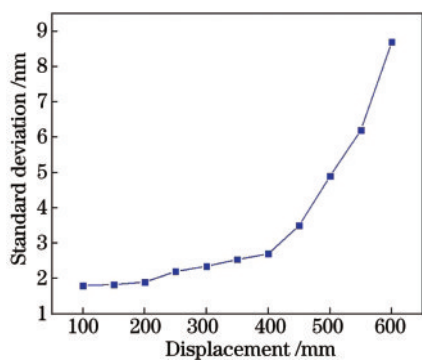


图 10 不同位置处固定点目标测量结果标准差分布图  
Fig. 10 Standard deviation distribution of measurement results of fixed point targets at different locations

600 mm 范围内分别进行四次重复性测量,实验结果表明:当目标匀速往返运动过程中,利用锯

齿波调制,采用快速鉴相算法对拍频信号相位进行解调,实现了运动目标跟踪测量,且四次线性拟合结果重合,表明该系统具有良好的重复性。

利用软件控制被测目标在电动直线位移平台上以不同速度进行 5 次重复匀速运动,软件设定位移量为 200 mm 时,对不同速度下待测目标的位移量进行测量,测量结果如表 1 所示。

由表 1 可知,当位移量一定时,待测目标运动速度逐渐增大,测量结果标准偏差也随之变大。其主要原因在于随着速度的递增,外界环境的干扰会对调频连续波干涉系统产生一定的影响。

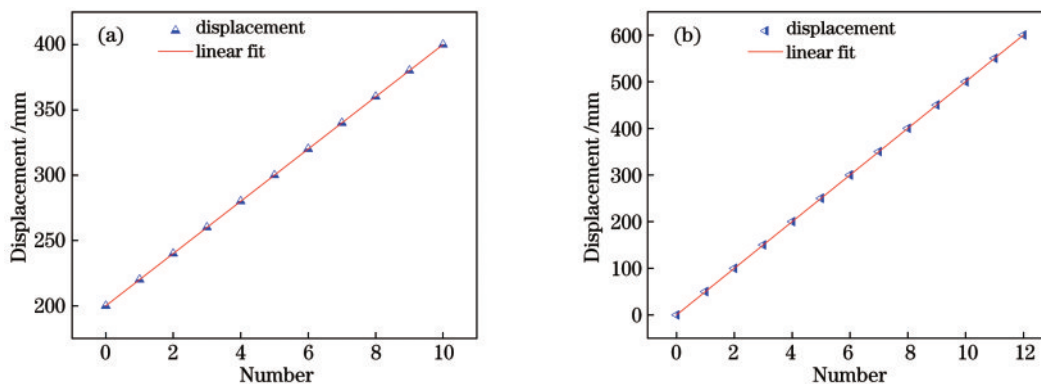


图 11 锯齿波调制下,运动目标线性度测量结果。(a) 200~400 mm 测量结果;(b) 0~600 mm 测量结果

Fig. 11 Linearity measurement results of the moving target under sawtooth wave modulation. (a) Measurement result of 200-400 mm; (b) measurement result of 0-600 mm

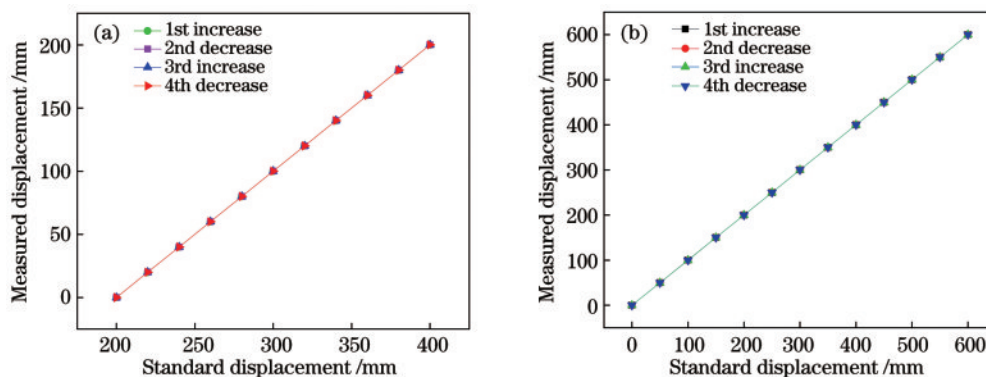


图 12 重复性测量实验图。(a) 200~400 mm 四次重复测量结果;(b) 0~600 mm 处四次重复测量结果

Fig. 12 Repeatability measurement experiment diagram. (a) Four repeated measurement results of 200-400 mm; (b) four repeated measurement results of 0-600 mm

表 1 不同运动速度下的位移测量结果

Table 1 Displacement measurement results at different movement speeds

Movement speed / (m·ms <sup>-1</sup> )	Standard deviation / nm
1	1.9
3	2.6
5	4.4
7	5.3

## 5 结 论

由于调频连续波激光干涉位移测量系统中存在干涉信号采样率和信号处理速度低的问题,本文搭建了一种高精度全光纤式的 FMCW 激光干涉位移测量系统,该系统采用法布里-珀罗干涉仪结构,使用 1550 nm 的 DFB 激光器作为激光光源,采用主频为 400 MHz 的高速 ARM 芯片 STM32H743 作为信号采集与处理芯片进行实验验证和分析,保证测

量系统的分辨率与实时性,利用该系统进行位移测量时的测量结果标准差在 200~400 mm 范围内优于 3.3 nm,在 0~600 mm 测量范围内线性拟合系数在 0.99998 以上,实验结果表明该系统具有非接触、高精度、结构紧凑等优点,在现代科研领域中具有一定的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Hu J L. Study on fiber-optic displacement sensor[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008: 13-16. 胡建良. 光纤微位移传感器研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008: 13-16.
- [2] Zheng J. Analysis of optical frequency-modulated continuous-wave interference[J]. Applied Optics, 2004, 43(21): 4189-4198.
- [3] Zheng J. Optical frequency - modulated continuous-wave interferometers[J]. Applied Optics, 2006, 45(12): 2723-2730.
- [4] Zheng J. Reflectometric fiber optic frequency-



- modulated continuous-wave interferometric displacement sensor[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(12): 124404.
- [5] Shi G, Zhang F M, Qu X H, et al. Absolute distance measurement by high resolution frequency modulated continuous wave laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(18): 184209.  
时光, 张福民, 曲兴华, 等. 高分辨率调频连续波激光绝对测距研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(18): 184209.
- [6] Zhang T J, Jiang Y, Ma W Y, et al. A high fineness optical fiber F-P pressure sensor based on MEMS[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170625.  
张韬杰, 江毅, 马维一, 等. 一种高精细度 MEMS 光纤 F-P 压力传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170625.
- [7] Liu Q, Wang M, Xia W, et al. Implementation of real-time displacement precision measurement technology for sinusoidal phase-shifting laser self-mixing interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0612011.  
刘强, 王鸣, 夏巍, 等. 正弦相位调制型激光自混合干涉仪的实时位移测量技术[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0612011.
- [8] Zhu H B. Research on key technologies in laser interference displacement and velocity measurement[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2017: 3-12.  
祝宏彬. 激光干涉位移及速度测量中的关键技术研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017: 3-12.
- [9] Hu M W. A signal processing method of precise displacement measurement of laser interferometer[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018: 8-19.  
胡梦雯. 激光干涉仪精密位移测量信号处理方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018: 8-19.
- [10] Tanaka Y, Miyata N, Kurokawa T, et al. Measurement of high-frequency dynamic displacement using light phase-modulated with triangle waveform[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(2): 025202.
- [11] Furukawa O, Tanaka Y. Proposal of interference signal processing for dynamic displacement measurement with high time-resolution[C]//2017 22nd Microoptics Conference (MOC), November 19-22, 2017, Tokyo. New York: IEEE Press, 2017: 216-217.
- [12] Yang W R, Wu S, Shang J F, et al. Design and test of synchronous generator excitation regulator based on STM32[J]. *Experimental Technology and Management*, 2019, 36(6): 79-84.  
杨文荣, 吴晟, 商建锋, 等. 基于 STM32 的同步发电机励磁调节器设计与试验[J]. *实验技术与管理*, 2019, 36(6): 79-84.
- [13] Zhao Z W, Wang W Y, Zhang M, et al. A new temperature compensation method by optimizing the structure of extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090605.  
赵子文, 王为宇, 张敏, 等. 通过改进非本征法布里-珀罗干涉型光纤传感器结构实现温度补偿的新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090605.
- [14] Wang L Q, Miao C Y, Zhang C, et al. Demodulation method of fiber Bragg grating pulse wave based on micro-structure Fabry-Perot interferometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1004002.  
王丽清, 苗长云, 张诚, 等. 基于微结构法布里-珀罗干涉仪的光纤光栅脉搏波解调方法[J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1004002.
- [15] Jing L Q, Zheng G, Sun B, et al. Measurement of distance to moving target using frequency-modulated continuous-wave interference technique[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1204001.  
井李强, 郑刚, 孙彬, 等. 基于调频连续波干涉技术的运动目标距离测量[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1204001.
- [16] Jing L Q, Zheng G, Zhang X X, et al. Nonlinear correction of frequency-modulated continuous wave interferometric laser sources[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1114001.  
井李强, 郑刚, 张雄星, 等. 一种调频连续波干涉激光光源非线性校正方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1114001.
- [17] Wang H, Zheng G, Chen H B, et al. Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180506.  
王欢, 郑刚, 陈海滨, 等. 调频连续波激光干涉光纤温度传感器[J]. *光电工程*, 2019, 46(5): 180506.